750kV输电线路风偏跳闸原因分析及改造措施研究

杨肖辉[1] 张 东[2] 李晓光[2] 董新胜[2] 张振泉[3] 陈艳超[1]

（1. 国网新疆电力公司乌鲁木齐供电公司 乌鲁木齐 830011

2. 国网新疆电力公司电力科学研究院 乌鲁木齐 830011

3. 国网新疆电力公司 乌鲁木齐 830000）



杨肖辉 男 1978年生，工程师，主要从事输电线路运维检修及管理工作。



张 东 男 1986年生，硕士研究生，主要从事输电线路防灾减灾工作。

摘要：为了查明750kV输电线路风偏跳闸的主要原因，采用解析法对绝缘子风偏后不同角度下的间隙距离进行分析，找出引起线路跳闸的风偏角。然后利用规程法对风偏角进行计算，得出设计风速31m/s的杆塔风偏安全裕量仅为5°，现场风速达到1.1倍设计风速下就会发生风偏跳闸。同时通过分析现场监测风速发现现场标准风速最大为27.5m/s，极大风速最大为40.5m/s，得出造成风偏跳闸的主要原因为极大风速超过设计风速的结论。最后针对需要改造的杆塔分析了输电线路防风偏措施的优缺点，得出750kV输电线路建议采用防风拉线型防风措施的结论，并对防风拉线选型进行了分析。通过防风改造有利于提高750kV输电线路的抗风能力，提高电网的安全运行水平。

关键词：风偏 跳闸 危险风偏角 标准风速 极大风速 防风拉线

中图分类号：TM86

Analysis and Reform Measures of 750kV Transmission Line Wind Biased Tripped

Yang Xiaohui[1] *Zhang Dong*[2] *Li Xiaoguang*[2] *Dong Xinsheng*[2] *Zhang Zhengquan*[3] *Chen Yanchao*[1]

（1. State Grid Electric Power Company Urumqi Xinjiang Power Company Urumqi 830011 China

2. State Grid Electric Power Research Institute of Xinjiang Electric Power Company Urumqi 830011 China

3. State Grid Electric Power Company of Xinjiang Urumqi 830011 China）

Abstract: In order to analyze the main reasons 750kV transmission line partial wind trip through analytical method for the insulator gap after the partial wind at different angles from the line to find the cause of the trip the wind angle. Then use the procedure law wind angle it calculated the design wind speed 31m/s tower wind partial safety margin of only 5 degrees, scene design wind speed reaches 1.1 times the wind speed wind occur partial trip. By analyzing the scene found the scene monitoring the wind speed with a speed of up to 27.5m/s, maximum wind speed up to 40.5m/s, the main cause of air drawn partial trip for maximum wind speed exceeds the design wind speed conclusions. Finally, the need for transformation of the transmission line towers analyze the advantages and

disadvantages of partial measures of wind, come 750kV transmission line is recommended pull-type wind measure wind conclusions, and the wind cable selection were analyzed. Wind through the transformation will help improve wind resistance 750kV transmission line to improve the level of safe operation of the grid.

Keywords: Wind biased, tripping, hazard wind angle, standard wind speed, maximum wind speed, wind cable

1　引言

新疆北倚阿尔泰山脉，南临喀喇昆仑山脉，中部横隔天山山脉，塔里木盆地和准噶尔盆地分别位于天山南北，三大山脉和二大盆地的地形造成新疆八大风区[1-4]。造成新疆输电线路风害跳闸事故较多，例如 2014 年 4 月 22 日夜间到 24 日，受西伯利亚强冷空气影响，北疆各地、天山山区和哈密等地出现伴有沙尘暴和大风天气。北疆、东疆大部有重霜冻和 6 级左右西北风，风三十里、百里风区的瞬间最大风力达 12 级以上。截止 24 日 18 时，共造成新疆公司所属 110kV 及以上输电线路跳闸 51 条 70 次（故障停运 35 条），其中 110kV 线路 16 条 20 次，220kV 线路 15 条 26 次，750kV 线路 3 条 7 次（天中直流、哈天一线陪停）。对新疆电网的正常运行造成严重影响，因此有必要对新疆输电线路风偏跳闸原因进行分析，制定有针对性的防范措施。

2　风偏事故介绍

下面介绍一起 750kV 风偏跳闸事故，4 月 23 日 09 时 01 分、11 时 18 分，750kV 吐哈一线两次跳闸，均重合失败。两次故障原因均为吐哈一线 326 号 B 相（左边相）风偏后导线侧均压环对横担放电引起线路跳闸。故障杆区段设计气象区为大风区，设计风速为 31m/s，326 号塔为 ZB131P 型直线塔，呼高 36m。导线、地线型号分别为 LGJK-310/50、JLB20A-100，边、中相串型分别为 I 串、V 串，边、中相绝缘子型号为 1*FXBW-750/210、2*FXBW-750/210。

3　750kV 输电线路风偏问题分析

3.1　风偏后电气间隙距离计算

326 号绝缘子设计如图 1 所示，从图中可以看出，受分裂导线和均压环影响，将整个绝缘子串行为一条线计算风偏后电气间隙距离会存在较大误差[5-6]。因此，有必要对绝缘子串悬挂导线后的模型重新进行等效。由于分裂导线和均压环直径比绝缘子伞裙直径大得多，在等效过程中主要考虑均压环和导线分裂支撑装置影响，简化后等效图如图 2 所示。

图 1　绝缘子串带金具结构图

Fig.1　Insulator string with Fittings

ZB231P 型杆塔塔头尺寸图如图 3 所示，根据绝缘子串等效图，绝缘子串风偏时与杆塔空气间隙距离如图 4 所示。

从图 4 中可以看出，风偏后，绝缘子串在达到跳闸条件时，均压环会首先对塔身放电[7-8]，以均压环距离杆塔最近的点画圆，其与塔身相切处为最近

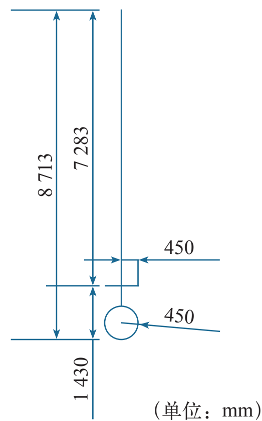


图 2　绝缘子加金具等效图

Fig.2　Insulator plus Fittings

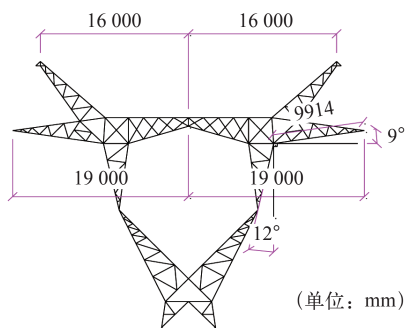


图 3　ZB231P 杆塔结构参数图

Fig.3　ZB231P tower structure parameters

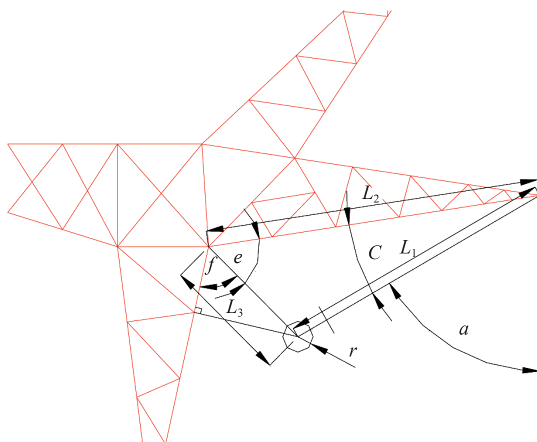


图 4　计算风偏后导线距离杆塔塔身距离图

Fig.4　After the calculation of the wind from the wire rod tower tower distance map

距离处，即图中直角处。由 ZB231P 型杆塔参数可知，图中角 a 与角 c 的和为 81°，L_1 也可由绝缘子串简化后参数得出，简化后 L_1 为 7.3m。同时由图上三角关系可以得出风偏时导线距离塔身最近距离计算公式为

$$d_1 = \sin c \cdot L$$

根据前面分析的风偏后导线距离杆塔横担距离的结果，可知 L_3 的计算公式为

$$L_3 = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2\cos c}$$

由图 4 可知，对于 ZB231P 型杆塔，其角 e 与角 f 之和是确定的，其和为 111°。利用解斜三角形可以求出角 e，然后利用角 f 和 L_3 计算出导线距离塔身最近距离为

$$d_2 = \sin f \cdot L_3 - r$$

根据 ZB231P 型杆塔结构参数和前述计算方法，计算不同风偏角时空气间隙距离见表 1。

表 1　ZB231P 型杆塔导线风偏时电气间隙距离与风偏角关系（以 40m 塔高）

Tab.1　ZB231P-type tower wire wind deviation when the electrical clearance distance and wind angleRelationship (40m heighttower)

距横担距离 /m	风偏角 /(°)
2.615 0	56
2.495 7	57
2.375 6	58
2.254 9	59
2.133 4	60
2.011 3	61
1.888 6	62
1.765 3	63
1.641 4	64

3.2　最大允许风速计算

根据 GB50545《110 ～ 750kV 架空输电线路设计规范》，海拔高度在 100m 以上时 750kV 带电部分与杆塔构件最小间隙距离为 1.9m。

根据规程规定，导线及地线的水平风荷载标准值和基准风压值，应为 [9]

$$W_X = \alpha W_0 \mu_z \mu_{sc} \beta_c d L_P B \sin^2\theta$$

$$W_0 = V^2 / 1600$$

式中，W_X 为与导地线垂直方向的水平风荷载(kN)；α 为风压不均匀系数，取 0.65；β_c 为导地线风荷载调整系数，取 0.9；μ_z 为风压随高度变化系数，基准高度 10m 处的风压高度变化系数按表 2

的进行确定；μ_{sc} 为导地线的体型系数，直径小于 17mm 或覆冰时（不论直径大小）应取 $\mu_{sc}=1.2$，直径大于或等于 17mm，取 1.1；d 为导地线外径；分裂导线取所有子导线外径总和（m）；L_P 为杆塔的水平档距（m）；B 为覆冰时风荷载增大系数，覆冰设计 5mm 时取 1.1，覆冰设计 10mm 时取 1.2；θ 为风向与导地线走向的夹角（°）；V 为基准高度为 10m 的风速（m/s）。

表 2　风压高度变化系数 μ_z

Tab.2　Variation coefficient of wind pressure height μ_z

离地面或海平面高度 /m	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
30	1.80	1.42	1.00	0.62
40	1.92	1.56	1.13	0.73
50	2.03	1.67	1.25	0.84
60	2.12	1.77	1.35	0.93
70	2.20	1.86	1.45	1.02

注：地面粗糙度类别：A 类指近海面和海岛、海岸、湖岸及沙漠地区；B 类指田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区；C 类指有密集建筑群的城市市区；D 类指有密集建筑且房屋较高的城市市区。

绝缘子串风荷载的标准值，应为

$$W_t = W_O \mu_z B A_l$$

式中，W_t 为绝缘子串风荷载标准值（kN）；A_l 为绝缘子串承受风压面积计算值（m^2）。

为了简化计算，假设绝缘子串和导线为刚体，风吹向绝缘子串和导线时绝缘子串和导线不产生任何弯曲或变形；同时将风压力视为静态力，均匀作用在导线和绝缘子串上；得出导线在风荷载作用下达到平衡状态时静力分析图如图 5 所示。

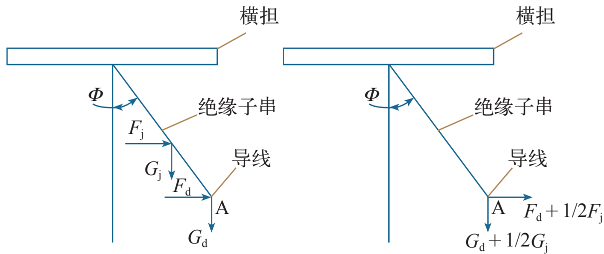


图 5　静力平衡时风偏分析图

Fig.5　Analysis of wind-deflection when static equilibrium

根据图 5 中右侧所示受力分析图可得风偏角 Φ 的计算公式

$$\Phi = \arctan \frac{F_d + \frac{F_j}{2}}{G_d + \frac{G_j}{2}}$$

式中，F_d 为垂直于导线方向的水平风荷截（N）；F_j 为绝缘子串风荷载（N）；G_d 为导线垂直荷载（N）；G_j 为绝缘子串重力荷载（N）。

根据前面不发生跳闸时允许风偏角计算值，同时取线路平均档距 500m，导线参数见表 3，计算得出不同高度的 ZB231P 型杆塔在工频和操作过电压下风速允许值见表 4 和表 5。

表 3　不同线路段导线型号

Tab.3　Wiring parameter table

导线型号	导线直径 /mm	导线重量 /(kg/km)
6×LGJ–400/50	27.43*6	1 510

表 4　不同型号杆塔不跳闸的允许风速值

Tab.4　allowable wind speed values for different types of towers without tripping

杆塔型号	杆塔高度 /m	风速允许值 /(m/s)
ZB231P	35 ~ 40	36.5
	41 ~ 50	35.4
	51 ~ 60	34.6

表 5　不同型号杆塔的重合成功允许风速值

Tab.5　allows the wind speed of the success of different models of tower overlap

杆塔型号	杆塔高度 /m	风速允许值 /(m/s)
ZB231P	35 ~ 40	26.2
	41 ~ 50	24.9
	51 ~ 60	24.1

4　风偏跳闸原因分析

首先分析跳闸时微气象监测装置监测到的风速值，4 月 23 日 297# 杆塔微气象监测数据如图 6 所示，从图中可以看出标准风速最大 27.5m/s，最大风速最大值 29.2m/s，极大风速最大值 40.5m/s。

根据前面分析可知，在标准风速小于 34m/s 时，ZP231P 型杆塔不会发生风偏跳闸，但现场实际发生了风偏跳闸，由此可见，采用标准风速计算输电线路风偏角存在偏小的情况，与现场情况不符。

根据线路在风偏时的受力分析，对于 ZB231P

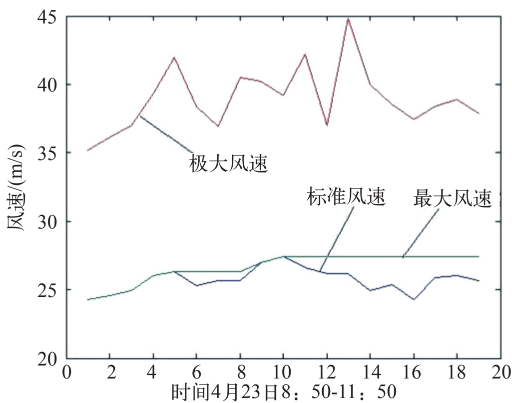


图 6　297# 塔微气象监测数据

Fig.6　297# tower micro-meteorological monitoring data

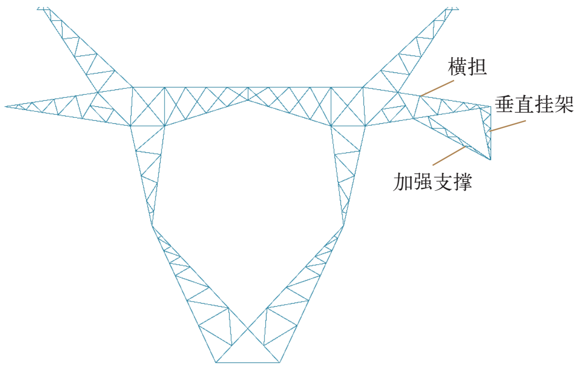


图 7　防风偏塔头效果图

Fig.7　Windproof tower head effect diagram

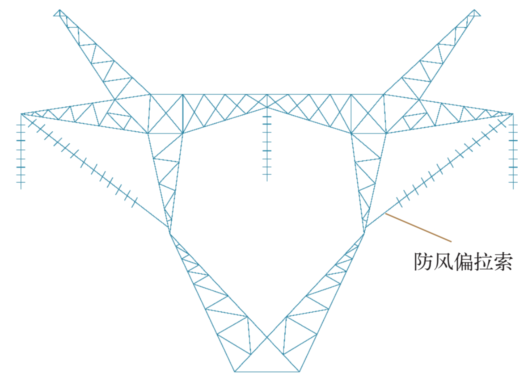


图 8　防风偏拉索安装图

Fig.8　Windproof cable installation diagram

型杆塔，其在风偏达到 61° 时电气间隙距离将小于 1.9m。以档距 500m，风速在 33m/s 时 ZB231P 型杆塔在风偏时将产生放电，导线风压在 33m/s 时达 78.682kN。

根据图 4，在风偏角从 0° 达到 61° 时，导线运动距离 9.276m。根据风荷载计算其在运动时平均加速度 78 682/4 824/2 = 8.16m/s^2。由此可计算其上升时间为 1.51s。而风速不可能从 0m/s 直接上升至 33m/s，在风速上升过程中可能已经有一定的风偏角度，虽然之前的风速可能达不到放电所需风速，在此时若有阵风出现，达到放电距离只需很短的时间，所以线路跳闸的原因是瞬时风速过大造成的。

根据表 5 不同型号杆塔重合成功允许风速值和图 6 事故发生时监测到的标准风速值可以看出，风偏跳闸后重合成功的风速允许值为 26m/s，而现场监测到的标准风速值为 28m/s 左右，所以很难重合成功。

5　750kV 线路风偏问题解决措施

5.1　边相横担增加垂直挂架

加装垂直挂架可以增加绝缘子串风偏时空气间隙距离 [10-11]，加装垂直挂架效果如图 7 所示。

根据前面的计算方法计算采用防风偏塔头改造效果，对于 ZB231P 型杆塔，加装垂直挂架长度为 1m 时，其允许风偏角提高到 66°，相当于在 1.2 倍设计风速时不会发生跳闸。

5.2　采用防风偏拉索

防风偏拉索安装如图 8 所示，该方案相对传统加装重锤的方式减少了对杆塔的影响，不需要停电改造，可以带电安装；相对于 I 型串改 V 型串的抗风偏措施来说，采用防风偏拉索的方案不需要改变杆塔横担结构，因此综合费用较低。通过现场应用情况看，该装置可以将风偏角限制在安全范围内，能够有效阻止导线在大风作用下对杆塔的放电。

5.3　在边相加装防风拉线

受新疆大风区 220kV 线路采用防风拉线的启发，也在考虑在 750kV 线路边相使用防风拉线。

5.4　新疆电网防风偏措施选择

根据前面介绍的几种防风偏措施，对于增加垂直挂架需对杆塔进行改造的方式，存在停电时间长，改造工程量大的问题。防风偏拉索在 750kV 线路上运行经验不足，而且加装防风偏安装后为一条直线，在绝缘子串后碰到防风偏拉索后容易出现横担受力过大造成损坏的事故，目前还只能用在 220kV 及以下线路上。所以在改造过程中选取了在边相加装防风拉线的方法。但由于是首次在 750kV 上采用防风拉线，需对其风偏时受力情况进行分析。

（1）允许风偏角及拉线与垂直线夹角优化。为

了保证线路在风偏时能够正常运行，其风偏允许角和拉线与垂直线夹角也不是越大越好，同时打防风拉线时应当注意防风拉线只有部分杆塔打有防风拉线，其他地方未打防风拉线，在其他未打防风拉线场合风偏跳闸后要考虑到重合情况，所以打防风拉线处应当考虑操作过电压放电问题，打拉线后，风偏允许角后其间隙距离大于操作过电压放电距离。根据重合成功要求允许悬垂串偏角30°，拉线需要预留约1.5m余长。

（2）加装防风拉线后风偏受力分析。加装防风拉线后受力如图9所示，以ZB231P型杆塔为例，以正常档距500m，风速31m/s进行计算。由前面的计算结果可知，ZB231P型杆塔在风速31m/s时导线风压89.37kN，导线垂直荷载49.88kN。计算杆塔绝缘子承受拉力为136.03kN，拉线绝缘子承受拉力83.63kN，均在绝缘子拉力承受范围内。若按极大风速45m/s校核，计算杆塔绝缘子承受拉力为167.23kN，拉线绝缘子承受拉力103.71kN，由此可见按极大风速校核时杆塔绝缘子拉力接近其正常使用拉力82%，存在绝缘子断串的风险，建议杆塔绝缘子采用双串。而拉线绝缘拉力在承受范围内，可以采用单串连接。

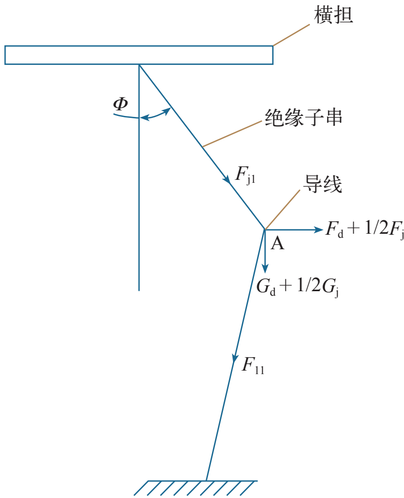


图9　打拉线后拉线和绝缘子受力分析图

Fig.9　After pulling the line and the insulator force analysis

（3）加装微气象监测装置。根据跳闸时风偏角是由微气象监测装置测得到的风速来分析的，可见微气象监测装置可有效地用于事故分析后的事故预防，建议在吐哈线上增加微气象监测装置，以提高对该区段风的认识，在新建线路时可以提供有效的风速设计依据。

6　结论

为了分析750kV输电线路风偏跳闸的主要原因，利用解析法对绝缘子风偏后不同角度下的间隙距离，找出引起线路跳闸的风偏角。然后利用规程法对风偏角进行计算，得出设计风速31m/s的杆塔风偏安全裕量仅为5°，现场风速达到1.1倍设计风速下就会发生风偏跳闸。同时通过分析现场监测风速发现现场标准风速最大为27.5m/s，极大风速最大为45m/s，得出造成风偏跳闸的主要原因为极大风速超过设计风速的结论。最后针对需要改造的杆塔分析了输电线路防风偏措施的优缺点，得出750kV输电线路建议采用防风拉线型防风措施的结论，并对防风拉线选型进行了分析。通过防风改造有利于提高750kV输电线路的抗风能力，提高电网的安全运行水平。

参考文献

[1]　陈洪武，辛渝，陈鹏翔，等．新疆多风区极值风速与大风日数的变化趋势[J]．气候与环境研究，2010，15(4)：479-490．
Chen Hongwu, Xin Yu, Chen Pengxiang, et al. Variation tendency of the extreme value of wind speeds and gale frequency over the windy regions in Xinjiang[J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(4): 479-490.

[2]　王敏仲，何清，魏文寿，等．新疆百里风区风廓线观测分析[J]．气象科技，2010，38(5)：640-644．
Wang Minzhong, He Qing, Wei Wenshou, et al. Observational Study of wind profiles in gale area in Xinjiang[J]. Meteorological Science and Technology, 2010, 38(5): 640-644.

[3]　朱智强，朱广贺．新疆风区大风监控预警系统研究[J]．数字技术与应用，2015，18(1)：39-39．
Zhu Zhiqiang, Zhu Guanghe. Study on early warning and monitoring system of gale in Xinjiang[J]. Digital Technology and Application. 2015, 18(1): 39-39.

[4]　王敏仲，何清，魏文寿，等．新疆百里风区大风天气的风廓线雷达资料分析[J]．沙漠与绿洲气象，2012，6(4)：52-59．
Wang Minzhong, He Qing, Wei Wenshou, et al. An observational study on gale weather processes over the hundred kilometres gale area in Xinjiang based on wind profiler radar[J]. Desert and Oasis

Meteorology, 2012, 6(4): 52-59.

[5] 胡毅．500 kV 输电线路风偏跳闸的分析研究 [J]．高电压技术，2004，30(8)：9-10．
Hu Yi. Study on trip caused by windage yaw of 500kV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(8): 9-10.

[6] 王声学，吴广宁，范建斌，等．500kV 输电线路悬垂绝缘子串风偏闪络的研究 [J]．电网技术，2008(9)：66-69．
Wang Shengxue, Wu Guangning, Fan Jianbin, et al. Study on flashover of suspension insulator string caused by windage yaw in 500kV transmission lines[J]. Power System Technology, 2008(9): 66-69.

[7] 李黎，肖林海，罗先国，等．特高压绝缘子串的风偏计算方法 [J]．高电压技术，2013，39(12)：2924-2932．
Li Li, Xiao Linhai, Luo Xianguo, et al. Windage yaw calculation method of UHV insulator strings[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 2924-2932.

[8] 孙保强，侯镭，孟晓波，等．不同风速下导线风偏动力响应分析 [J]．高电压技术，2010，36(11)：2808-2813．
Sun Baoqiang, Hou Lei, Meng Xiaobo,et al. Characteristics analysis of conductors diaplacement under different wind speeds[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2808-2813.

[9] GB50545 110 ～ 750kV 架空输电线路设计规范 [S]．2010．

[10] 郑佳艳，严波，刘小会，等．悬垂绝缘子串动态风偏响应的数值模拟 [J]．重庆大学学报，2006，29(12)：100-103，115．
Zheng Jiayan, Yan Bo, Liu Xiaohui, et al. Numerical simulation of dynamic response of suspension insulator string[J]. Journal of Chongqing University, 2006, 29(12): 100-103, 115.

[11] 龙立宏，胡毅，李景禄，等．输电线路风偏放电的影响因素研究 [J]．高电压技术，2006，32(4)：19-21．
Long Lihong, Hu Yi, Li Jinglu, et al. Study on windage yaw discharge of transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(4): 19-21.